中国生态农业学报 2016 年 12 月 第 24 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2016, 24(12): 1598−1606

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160422

藕–鱼种养结合模式对藕田底栖动物的影响*

沈亚强 姚祥坦 程旺大**

(浙江省嘉兴市农业科学研究院(所) 嘉兴 314016)

摘 要 低洼田因地制宜创新农作制度，构建的藕–鱼种养结合模式是一种新型高效的生态农业模式，其中底栖动物是这个复合生态系统的重要组成部分。为研究藕–鱼种养结合模式对藕田底栖动物的影响，本试验设计了 3 种模式(莲藕–甲鱼模式、莲藕–彩鲤模式以及莲藕–泥鳅模式)，以单养甲鱼模式作为对照，于种养结合前(2013 年 3 月)、种养结合后作物生长旺盛期(2013 年 8 月)以及鱼类捕捞后(2014 年 1 月)3 个时期对各试验田块底栖动物进行了取样，分析种养结合前后藕田底栖动物的种类构成、密度、生物量和多样性的变化。结果表明，种养结合模式对底栖动物种类无显著影响，共采集到底栖动物 6 科 12 属 13 种。但藕田套养水产动物，由于水产动物活动对底泥的扰动，底栖动物多样性有所下降。种养结合模式田块水生昆虫密度、生物量以及底栖动物总密度、总生物量均较种养结合前大幅度增加。3 种种养结合模式种养结合后水生昆虫密度、生物量以及底栖动物总密度、总生物量的平均增加幅度分别达到 12 倍、336 倍、11 倍和 273 倍。而单养甲鱼模式池塘放养甲鱼后底栖动物生物量较放养前有所减少。另外，与单养甲鱼模式相比，莲藕–甲鱼种养结合模式水生昆虫密度、生物量以及底栖动物总密度、总生物量均有所提高，而寡毛类密度、生物量则有所降低。此外，采用 Shannon-Wiener 多样性指数和 BI 生物指数(Hilsenhoff 生物指数)对 3 种种养结合模式藕田水质进行了评价。结果表明，采用 BI 生物指数评价的结果与实际情况较为吻合，3 种种养结合模式中水质状况以莲藕–彩鲤模式最好，而莲藕–泥鳅模式水质最差。

关键词 藕–鱼种养结合模式 底栖动物 密度 生物量 多样性指数 水质
中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)12-1598-09

Effects of integrated lotus-fish farming systems on macrozoobenthos in lotus field*

SHEN Yaqiang, YAO Xiangtan, CHENG Wangda**

(Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Zhejiang Province, Jiaxing 314016, China)

Abstract Integrated Agri-Aquaculture Systems (IAAS) such as rice-fish farming have been practiced for centuries in China. In these systems, on-farm wastes and by-products are recycled in relatively closed nutrient cycles. IAAS also utilizes resource efficiently and provides additional food and income to local farmers. Thus these systems are more sustainable compared with other food production systems such as monoculture systems. In the north of Jiaxing City, Zhejiang Province, a wide area of low-lying wetlands exists because of land subsidence. The permanently flooded field is not suitable for grain and oilseed rape production and thus agricultural economy development in the area is seriously restricted. As an innovation of IAAS, the trapa-fish (e.g. trapa-loach, trapa-Chinese snakehead fish and trapa-Chinese soft-shelled turtle), lotus-fish (e.g. lotus-loach, lotus-Chinese

* 浙江省农业技术推广基金会 2011 年"创新农作制度深化研究"专项重点项目、浙江省嘉兴市科技计划项目(2012AZ2019)和浙江省公益性技术应用研究计划项目(2013C32029)资助
** 通讯作者: 程旺大，主要研究方向为农产品产地生态环境与质量安全。E-mail: chwd228@163.com
沈亚强，主要研究方向为湿地农业。E-mail: shenyaqiang@163.com
收稿日期: 2016−05−07 接受日期: 2016−08−08

* This study was supported by the Special Fund for Farming Systems Innovation of Zhejiang Agricultural Technology Extension Foundation in 2011, the Natural Science Foundation of Jiaxing City (2012AZ2019) and the Public Welfare Technology Applied Research Projects of Zhejiang Province (2013C32029).
** Corresponding author, E-mail: chwd228@163.com
Received May 7, 2016; accepted Aug. 8, 2016

soft-shelled turtle and lotus-Chinese snakehead fish) and water bamboo-fish (e.g. water bamboo-loach) integrated patterns were being gradually developed in recent years. As an important ecological group in freshwater ecosystems, macrozoobenthos are important in material cycling and energy flow, and are widely used in environmental monitoring. In order to determine the response of macrozoobenthos diversity to lotus-fish farming, field experiments were conducted in Zhejiang Northbay Wetland Eco-agricultural Science and Technology Ltd. Co. Three typical integrated lotus-fish farming systems (including integrated lotus-soft-shelled turtle system, integrated lotus-Oujiang color common carp system and integrated lotus-loach system) along with one monoculture system (soft-shelled turtle monoculture system) were selected in the study. Ecological surveys of each system were carried out at three periods — before lotus-fish co-culture period (late March 2013), after lotus-fish co-culture and the lotus in vigorous growth period (mid-August 2013) and after fish harvesting period (early January 2014). The species composition, standing crops and diversity of samples were analyzed. Altogether, 13 macrozoobenthos taxa belonging to 6 families and 12 genera were identified from all the qualitative and quantitative samples. Results showed that there was no significant difference in the macrozoobenthos species after the adoption of integrated lotus-fish farming system. However, macrozoobenthos biodiversity decreased because of sediment disturbance caused by aquatic animals after fish stocking. The density and biomass of aquatic insects and macrozoobenthos in the integrated lotus-fish farming systems all increased after fish stocking. The average density and biomass of aquatic insects, total density and biomass of macrozoobenthos increased by 12 times and 336 times, 11 times and 273 times, respectively. However, in the soft-shelled turtle monoculture system, macrozoobenthos biomass decreased after soft-shelled turtle stocking. Meanwhile, the integrated lotus-soft-shelled turtle system had higher density and biomass of aquatic insects and macrozoobenthos compared with soft-shelled turtle monoculture system. Conversely, the density and biomass of oligochaetes in integrated lotus-soft- shelled turtle system were lower than those in monoculture system. Results of bioassessment using Hilsenhoff biotic index indicated that water quality under lotus-Oujiang color common carp system was better than that under lotus-loach system and lotus-soft-shelled turtle system.
Keywords　Integrated lotus-fish farming systems; Macrozoobenthos; Density; Biomass; Diversity index; Water quality

浙江北部毗邻江苏地区(嘉兴市北部)地势平坦，地面高程低，加之近年来由于不合理开采地下水等引起的地面沉降，内外水位常年倒挂，农田长期处于水淹状态，属典型的洼地湿地区域。长期以来，这一地区传统农业主要以水稻、春花作物种植以及水产养殖为主。但种粮易涝，而单一、大规模的水产养殖也对周边环境带来了一定的污染，严重制约了当地农业的发展[1–2]。自 2009 年以来，当地开始探索利用低洼稻田创新农作制度，将水产养殖与水生作物种植结合起来，发展综合种养模式。由于经济效益较为可观，种养结合模式得到了众多农业龙头企业和农民的欢迎。近年来，种养结合模式面积迅速扩大。据嘉兴市秀洲区农业经济局统计，2015 年仅嘉兴市秀洲区全区种养结合模式面积已达 570 hm^2。

国内外研究表明，水产养殖与传统农业相结合的农业–水产复合生态模式(integrated agri-aquaculture systems, IAAS)是促进湿地农业可持续发展、保证粮食安全的有效途径[3–5]。在这一复合生态系统中，水产养殖所产生的废弃物等可以作为农业生产的营养和能量，因而，该模式具有较高的资源利用效率和系统生产力[6–7]。目前，这一模式在世界上许多国家和地区都有分布，其中尤以亚洲国家发展最为成熟，相关科学研究也开展得最为系统、深入。例如，国际水生生物资源管理中心曾对亚洲各地区典型的湿地生态种养结合模式进行了系统总结[8]，Edwards 等[9–10]对作物–牲畜–鱼复合种养模式进行了系统总结。在各种农业–水产复合生态模式中，历史最为悠久，应用范围最广的莫过于稻田种养模式。国内外针对这一模式开展了大量的研究，主要集中于稻田种养模式的生态、经济效益[11–16]、病虫草害的控制[17–20]以及对稻田生态环境的影响[21–31]等方面。近年来，不少学者针对稻田种养模式对稻田水生生物的影响开展了一系列研究，如 Ali[32]对稻田养鱼模式水体浮游甲壳动物以及轮虫群落的季节动态进行了系统研究，李岩等[33–34]对稻蟹共作模式对水体浮游生物和底栖动物多样性的影响进行了系统研究，曹凑贵等[35]、汪金平等[36]以及王昌付等[37]对稻田养鸭模式对稻田水生生物的影响进行了系统研究。

近年来，随着种植业结构的调整优化，一些地区充分利用当地自然资源优势，瞄准国内外市场需求，把水生蔬菜作为重要的特色蔬菜品种进行培育，有力促进了水生蔬菜产业的大力发展。目前我国水生蔬菜种植面积在 73.3 万 hm^2 以上，主要种植种类包括莲藕(*Nelumbo nucifera*)、茭白(*Zizania latifolia*)、芋头(*Colocasia esculenta*)、荸荠(*Eleocheris dulcis*)、慈姑(*Sagittaria trifolia*)、菱(*Trapa bispinosa*)、水蕹菜(*Ipomoea aquatica*)、芡实(*Euryale ferox*)、水芹(*Oenanthe javanica*)、莼菜(*Brasenia schreberi*)、豆瓣

菜(*Nasturtium officinale*)、蒌蒿(*Artemisia selengensis*)及蒲菜(*Typha latifolia*)等, 总产值达 550 亿元, 而莲藕是其中栽培面积最大的作物, 全国栽培面积达 40 万 hm^2[38]。水生蔬菜产业的大力发展, 也促进了水生蔬菜种植与水产养殖相结合的综合种养模式的发展。特别是藕田养殖模式, 近年来面积增加显著。但由于藕田种养模式技术要求较单养及单种模式要高, 而关于这一模式开展的系统研究与稻田种养模式相比又明显偏少, 这也从一方面限制了该模式的发展。目前已有的一些研究主要集中于对种养结合后莲藕、鱼类生长状况[2,39–40]以及对藕田水体、土壤理化性状影响的研究[40–41]上, 而对藕田水生生物包括浮游生物以及底栖动物等的影响的研究很少。底栖动物是水生态系统的一个重要组成部分, 部分底栖动物本身具有很高的经济价值, 可以作为水产动物的天然饵料, 部分底栖动物还可作为环境监测的指示生物。本文研究了藕鱼种养结合模式对藕田底泥中底栖动物群落结构及其多样性的影响, 以期为藕田种养模式水体生物多样性保护提供依据, 为藕田种养模式的可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验地点在浙江省嘉兴市秀洲区王江泾镇浙江北部湾湿地农业生态科技有限公司园区内(N30°52′32″, E120°43′46″)。选取该园区内具有代表性的 3 种藕–鱼种养结合模式开展研究, 这 3 种模式分别为莲藕–甲鱼模式(*Nelumbo nucifera*-*Pelodiscus sinensis*)、莲藕–泥鳅模式(*Nelumbo nucifera*-*Misgurnus anguillicaudatus*)以及莲藕–彩鲤(*Nelumbo nucifera*-*Cyprinus carpio* var. *color*)模式。另外, 考虑到浙江北部湾湿地农业生态科技有限公司园区内, 以莲藕–甲鱼模式面积最大, 因此本研究选取单养甲鱼池塘作为对照。种养结合藕田于四周挖一条深 1.2 m、宽 1.2 m 的围沟, 中间挖一条宽 0.8 m、深 0.8 m, 两头贯通的十字交叉型鱼沟。各试验田块于 2013 年 1 月初左右, 鱼类捕捞完后排干池水进行晒塘, 至 2 月中旬左右再全塘泼洒生石灰进行消毒。消毒 1~2 周后放满池水。于 2013 年 3 月下旬莲藕定植前对各试验田块底栖动物进行第一次采样, 此时即为应用种养结合模式前底栖动物状况, 文中统一定义为“种养结合前”时期。于 4 月上旬种植莲藕, 11 月底开始采收, 种养结合藕田不施肥, 其他日常管理措施同当地常规莲藕栽培。藕田鱼苗则于 5 月上旬投放。单养甲鱼塘以及莲藕–甲鱼模式田块中甲鱼日常以投喂动物性饲料为主, 投放于固定食台上, 每日早、晚各一次; 莲藕–彩鲤模式不投喂饲料; 而莲藕–泥鳅模式日常主要投喂鱼类内脏及生猪宰杀后的下脚料等为主, 将鱼类内脏及下脚料煮熟后直接定点泼洒于藕田一角落。各试验田块水产动物于翌年 1 月份捕捞。具体各模式面积、放养鱼苗规格以及放养量等见表 1。于 2013 年 8 月中旬莲藕及水产动物生长旺盛期以及 2014 年 1 月初莲藕采收完毕且鱼类捕捞完后两个时期再次对各模式田块底栖动物进行采样。这两个时期均为应用种养结合模式后的时期, 文中统一定义为“种养结合后”时期, 两个时期底栖动物的平均现存量特征即为应用种养结合模式后底栖动物的现存量特征。底栖动物的采集分为定量采集和定性采集。定量样品用 1/16 m^2 的彼得生采泥器采集, 每一田块采集 3 次后将泥样混合, 经 24 目·cm^{-1} 的筛子筛洗后, 置于白色解剖盘中分捡动物标本, 并用 10%的福尔马林固定, 然后进行种类鉴定、计数并称重。另外, 采用彼德森采泥器结合 40 目手抄网增加围沟和田内随机采样, 以进行底栖动物的定性分析。底栖动物湿重的测定方法是: 先用滤纸吸干水份, 然后在精确到 0.000 1 g 的电子天平上称量(其中软体动物为带壳湿重)。最后将密度和生物量数据换算成单位面积的含量。底栖动物鉴定水平大部分到属或种, 鉴定参考相关文献[42–45]进行。

表 1 不同藕-鱼种养结合模式田块面积及水产动物放养方案
Table 1 Field areas and aquatic animal stocking schemes of different integrated lotus-fish farming patterns

模式 Pattern	田块面积 Field area (hm^2)	苗种规格 Larval size (g)	放养密度 Stocking density (ind·hm^{-2})	每日投饲次数 Feeding times everyday	投饲率 Feeding rate (%)
单养甲鱼模式 Soft-shelled turtle monoculture system	0.50	250	10 095	2	1.4
莲藕–甲鱼模式 Integrated lotus-soft-shelled turtle system	0.47	250	9 900	2	1.4
莲藕–彩鲤模式 Integrated lotus-Oujiang color common carp system	0.20	50	2 500	0	0
莲藕–泥鳅模式 Integrated lotus-loach system	0.32	5.2	805 000	2	5.0

1.2　多样性指数的计算方法

采用 Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数对种养结合前后底栖动物多样性进行评价。

Simpson 多样性指数计算公式:

$$D=1-\sum(n_i/N)^2 \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数计算公式:

$$H=-\sum[(n_i/N)\ln(n_i/N)] \quad (2)$$

式中: n_i 为单位面积样品中第 i 种的密度(ind·m^{-2}), N 为单位面积样品中收集到的底栖动物的总密度(ind·m^{-2})。

采用 Shannon-Wiener 指数和 BI 指数(Hilsenhoff 生物指数)对各模式藕田的水质进行生物评价。

Shannon-Wiener 指数评价标准: 指数值>3, 清洁; 2~3, 轻度污染; 1~2, 中度污染; 0~1, 严重污染[46]。

BI 生物指数计算公式:

$$BI=\sum t_i\,(n_i/N) \quad (3)$$

式中: n_i 为第 i 个分类单元(通常为属级或种级)的个体数, N 为样本总个体数, t_i 为第 i 个分类单元的耐污值。底栖动物的耐污值主要参考王备新等[47]、张跃平[48]以及秦春燕[49]的资料。

BI 生物指数评价标准: 指数值<3.50, 极清洁; 3.51~4.50, 很清洁; 4.51~5.50, 清洁; 5.51~6.50, 一般; 6.51~7.50, 轻度污染; 7.51~8.50, 中度污染; 8.51~10, 严重污染[50–51]。

1.3　数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据分析。

2　结果与分析

2.1　不同种养结合模式的底栖动物种类变化

试验共采集到底栖动物 6 科 12 属 13 种(表 2), 主要以寡毛类及水生昆虫为主。从种养结合前后底栖动物种类对比上看, 除裸泽蛭(*Helobdella nuda*)这一偶见种在种养结合后未采集到外, 其他种类种养结合前后各时期均有采集到。

表 2　藕-鱼种养结合模式种养结合前后底栖动物种类变化

Table 2　Species of macrozoobenthos occurring in different periods of different integrated lotus-fish farming systems

门 Phylum	纲/目 Class or order	科 Family	种 Species	种养结合前 Before lotus-fish co-culture period	种养结合后 After lotus-fish co-culture period
环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	颤蚓科 Tubificidae	霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*	+	+
			水丝蚓属一种 *Limnodrilus* sp.	+	+
			多毛管水蚓 *Aulodrilus pluriseta*	+	+
			苏式尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi*	+	+
	蛭纲 Hirudinea	舌蛭科 Glossiphoniidae	裸泽蛭 *Helobdella nuda*	+	
软体动物门 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	田螺科 Viviparidae	铜锈环棱螺 *Bellamya aeruginosa*	+	+
		椎实螺科 Lymnaeidae	椭圆萝卜螺 *Radix swinhoei*	+	+
节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta 蜉蝣目 Ephemeroptera	蜉蝣科 Ephemeridae	蜉蝣属一种 *Ephemera* sp.	+	+
	双翅目 Diptrea	摇蚊科 Chironomidae	环足摇蚊属一种 *Cricotopus* sp.	+	+
			摇蚊属一种 *Chironomus* sp.	+	+
			小摇蚊属一种 *Microchironomus* sp.	+	+
			多足摇蚊属一种 *Polypedilum* sp.	+	+
			异腹鳃摇蚊属一种 *Einfeldia* sp.	+	+

“种养结合前”指田块整理完即将种植莲藕前的时期, “种养结合后”指种植莲藕及放养水产动物后的时期。Before lotus-fish co-culture period refers to the period after the field preparation but before lotus planting. After lotus-fish co-culture period refers to the period after the lotus aquatic animals co-culture for some time.

2.2　不同种养结合模式的底栖动物密度、生物量变化

从种养结合后各模式底栖动物密度、生物量变化上看(图 1), 种养结合后底栖动物总密度、总生物量均有所增加。3 种种养结合模式种养结合后底栖动物总密度和总生物量的平均增加幅度分别达到 12 倍和 336 倍。各类群中, 水生昆虫的密度和生物量增加较多, 3 种种养结合模式种养结合后水生昆虫密度和生物量的平均增加幅度分别为 11 倍和 273 倍。另外, 各种养结合模式田块所采集的定量样品中均未检测到软体动物及其他底栖动物, 而单养甲鱼模式池塘在放养甲鱼前的样品中检测到了软体动物及其他底栖动物, 但未检测到寡毛类。且单养甲鱼模式池塘在放养甲鱼后, 水生昆虫密度、生物量均有所减少, 而底栖动物总密度则比放养甲鱼前有所增加, 但底栖动物总生物量则有所减少。莲藕–甲鱼种养结合模式与单养甲鱼模式相比, 在放养甲鱼后,

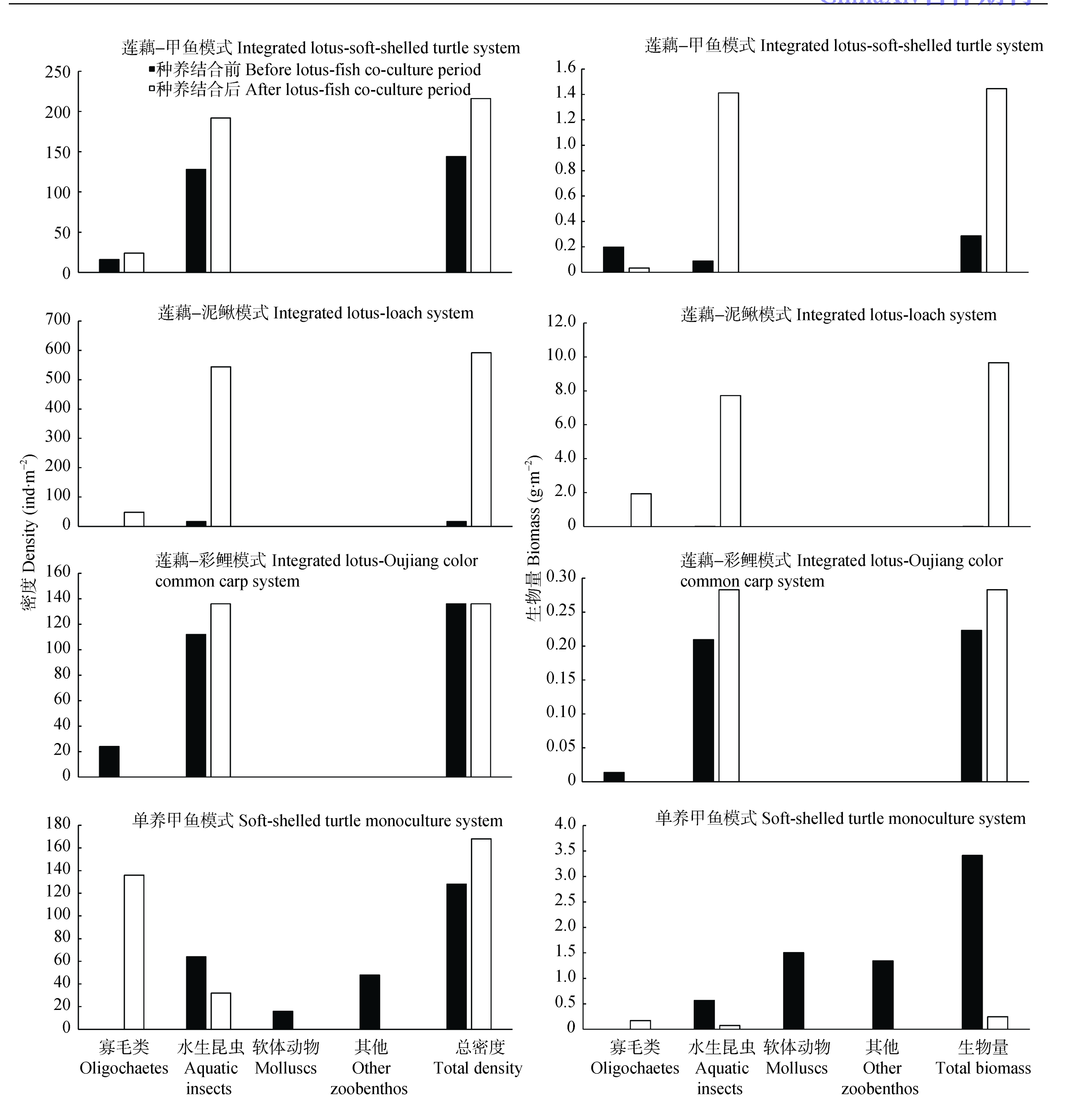


图 1 不同藕–鱼种养结合模式种养结合后底栖动物密度和生物量的变化

Fig. 1 Variations of density and biomass of macrozoobenthos in sediments after lotus-fish co-culture of different integrated lotus-fish farming patterns

水生昆虫密度、生物量均要高，而寡毛类密度、生物量则均要低，但底栖动物总密度、总生物量仍要高于单养模式。

2.3 不同种养结合模式的底栖动物生物多样性指数变化

种养结合后底栖动物生物多样性指数的变化如图 2 所示。种养结合后, Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数均有所下降，表明藕田套养鱼类后，底栖动物多样性有所下降。

2.4 不同种养结合模式的水质生物学评价

由表 3 可见，根据 Shannon-Wiener 指数评价污染状况标准，莲藕–甲鱼、莲藕–泥鳅以及莲藕–彩鲤 3 种模式种养结合后, Shannon-Wiener 指数虽均较种养结合前有所降低，表明水质变差，但水质级别未有变化，均呈严重污染状态。种养结合后 3 种模式中以莲藕–泥鳅模式 Shannon-Wiener 指数值最高，而莲藕–彩鲤模式 Shannon-Wiener 指数值最低。仅从 Shannon-Wiener 指数值来看, 3 种种养结合模式中

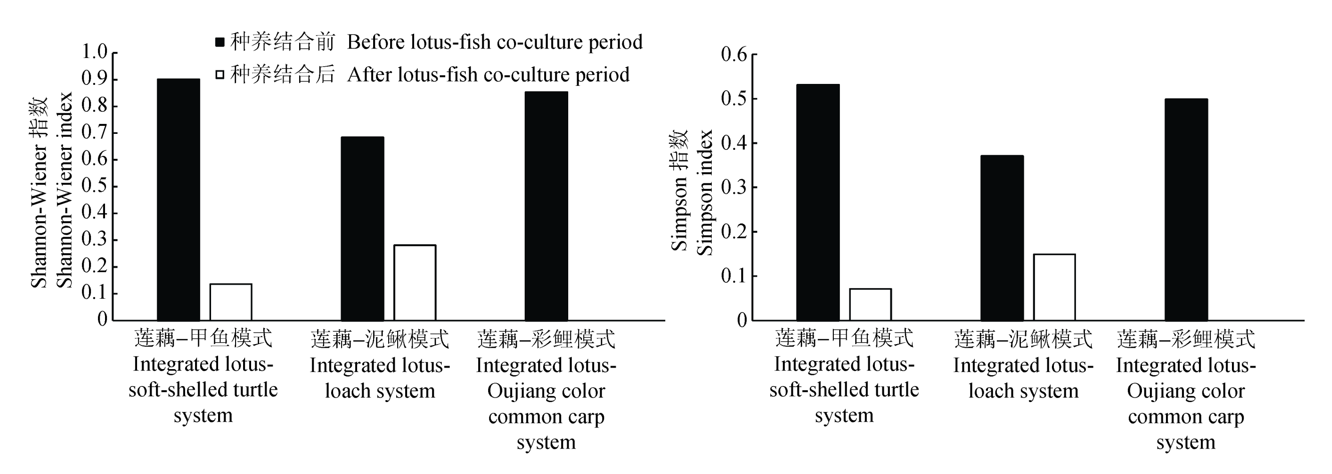


图 2　不同藕–鱼种养结合模式种养结合后底栖动物 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数的变化
Fig. 2　Variations of Shannon-Wiener index and Simpson index of macrozoobenthos in sediments after lotus-fish co-culture of different integrated lotus-fish farming patterns

表 3　不同藕-鱼种养结合模式种养结合前后生物指数值和水质评价结果
Table 3　Dynamics of bio-index value and assessment of water quality after lotus-fish co-culture of different integrated lotus-fish farming patterns

模式 Pattern	时期 Period	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener diversity index		BI 生物指数 Biotic index	
		指数值 Index value	水质评价 Water quality grade	指数值 Index value	水质评价 Water quality grade
莲藕–甲鱼模式 Integrated lotus-soft-shelled turtle system	种养结合前 Before lotus-fish co-culture period	0.90	严重污染 Seriously polluted	6.50	一般 Fair
	种养结合后 After lotus-fish co-culture period	0.14	严重污染 Seriously polluted	8.35	中度污染 Moderately polluted
莲藕–泥鳅模式 Integrated lotus-loach system	种养结合前 Before lotus-fish co-culture period	0.68	严重污染 Seriously polluted	8.89	严重污染 Seriously polluted
	种养结合后 After lotus-fish co-culture period	0.28	严重污染 Seriously polluted	9.05	严重污染 Seriously polluted
莲藕–彩鲤模式 Integrated lotus-Oujiang color common carp system	种养结合前 Before lotus-fish co-culture period	0.85	严重污染 Seriously polluted	7.75	中度污染 Moderately polluted
	种养结合后 After lotus-fish co-culture period	0	严重污染 Seriously polluted	8.05	中度污 Moderately polluted

水质状况以莲藕–泥鳅模式最好，而莲藕–彩鲤模式水质最差。

BI 生物指数方面，莲藕–甲鱼模式，种养结合后 BI 生物指数值较种养结合前明显升高，表明水质明显变差，水质级别下降两个等级，由一般状态转变为中度污染状态。而莲藕–泥鳅以及莲藕–彩鲤模式，种养结合后，BI 生物指数虽较种养结合前有所升高(表明水质有所变差)，但水质级别未有变化。从 BI 生物指数值来看，种养结合后 3 种模式中以莲藕–泥鳅模式 BI 指数值最高，而莲藕–彩鲤模式 BI 生物指数值最低。根据 BI 生物指数评价的结果表明，3 种种养结合模式中水质状况以莲藕–彩鲤模式相对最好，而莲藕–泥鳅模式水质相对最差。根据程旺大等[52]采用化学方法对这 3 种种养结合模式水质评价的研究，整体水质以莲藕–彩鲤模式相对最好，而莲藕–泥鳅模式水质相对最差。故本研究中采用 BI 生物指数评价的结果与实际情况较为吻合。

3　结论与讨论

低洼田藕–鱼种养结合模式作为一种新型的湿地循环农业模式，具有较高的经济、社会和生态效益。但目前有关这种模式水生生物群落结构、多样性方面的研究较少，特别是底栖动物方面。

本研究表明，种养结合模式对底栖动物种类无显著影响，但藕田套养水产动物后，由于水产动物活动以及觅食等对底泥的扰动，底栖动物多样性有所下降。这与李岩等[33–34]针对稻蟹共作模式以及曹凑贵等[35]、王昌付等[37]针对稻鸭共作模式开展的对底栖动物的影响的研究相一致。

根据已有一些对养鱼池塘底栖动物群落时空变化的研究[53–55]，养鱼池塘底栖动物生物量的峰值多出现在春季，而后缓慢下降，至秋季可能再次迎来一小高峰，然后再次下降。也就是说，养鱼池塘底栖动物春、秋两季生物量是相对较高的，而夏、冬两

季生物量较低。从本研究对单养甲鱼模式的研究来看，虽然秋季未对该模式池塘底栖动物进行调查，但从放养甲鱼前(春季)以及放养甲鱼后(夏季、冬季两次平均值)底栖动物生物量特征推断，池塘单养甲鱼模式底栖动物时空变化可能也遵循这一趋势。但若采用种养结合模式，底栖动物的变化趋势则就有所不同。从本研究中莲藕–甲鱼式种养结合后底栖动物变化上看，种养结合后(夏季、冬季两次平均值)水生昆虫密度、生物量以及底栖动物总密度、总生物量均较种养结合前(春季)有大幅增加。莲藕–泥鳅和莲藕–彩鲤这两种模式种养结合后底栖动物现存量变化的趋势亦是如此。此外，与单养甲鱼模式相比，同样在放养甲鱼后，莲藕–甲鱼种养结合模式水生昆虫密度、生物量以及底栖动物总密度、总生物量均要高于单养模式，而寡毛类密度、生物量则要低于单养模式。分析其原因可能是种养结合条件下，莲藕的存在大大降低了水产动物活动对底泥扰动的影响，从而为底栖动物提供了更为稳定的生境条件，故底栖动物数量在夏季以及冬季数量并未下降。而另外一方面，莲藕–甲鱼种养结合模式与单养甲鱼模式相比，由于莲藕的吸收作用，水体以及底泥营养水平要比单养池塘低，因此耐污的颤蚓科寡毛类数量要少。

目前，采用生物监测法监测湖泊、河流水质的研究较多，而鲜见采用生物评价法评价池塘水质的研究。本研究采用两种生物指数对不同种养结合模式种养结合后藕田水质进行了评价，对照作者同期采用化学方法开展的水质评价研究，确认 BI 生物指数适合作为藕–鱼种养结合模式底栖动物水质生物评价的指标，运用该指数评价的结果与实际情况较为吻合。根据评价结果，3 种种养结合模式中，整体水质以莲藕–彩鲤模式相对最好，而莲藕–泥鳅模式水质相对最差。从实际情况看，6—9 月份，由于投饲等原因，莲藕–甲鱼以及莲藕–泥鳅两种模式藕田水体富营养化严重，水华爆发，而莲藕–彩鲤模式藕田未见水华爆发。

藕鱼共生生态系统是一个随着鱼类的生长发育而变化的动态系统。本文在研究底栖动物时，仅在莲藕、鱼类生长旺盛时期以及鱼类捕捞收获后两次进行取样，并没有充分研究种养结合系统中鱼类的动态变化。结合共生环境、其他水生动植物、莲藕生长及鱼类习性，系统地了解该共生模式下的生态系统组份动态变化，将为湿地农业种养结合模式提供更为系统的理论指导。

致谢 在本研究过程中，嘉兴市农业技术推广基金会蒋唯民会长、杜云昌原会长、杨治明副会长、高寅华秘书长、顾忠烈副秘书长和嘉兴市秀洲区农业技术推广基金会周志明会长等给予了大力帮助和支持，在此表示感谢。

参考文献 References

[1] 周萍. 秀洲区北部发展水生蔬菜的优势与措施[J]. 浙江农业科学, 2010(3): 466–468
Zhou P. The advantage and measures for developing the aquatic vegetable planting in the north of Xiuzhou District[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2010(3): 466–468

[2] 姚祥坦, 沈亚强, 张红梅, 等. 低洼田湿地“植–鱼”种养结合模式对莲藕、菱生长发育及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1643–1649
Yao X T, Shen Y Q, Zhang H M, et al. Effects of “plant-fish” integrated farming system on the growth and quality of *Nelumbo nucifera* Gaertn and *Trapa acornis* Nakano in the lowland areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1643–1649

[3] Cassman K G, Wood S, Sze Choo P, et al. Cultivated systems[M]//Hassan R, Scholes R, Ash N. Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends, Volume 1. Washington: Island Press, 2005: 745–794

[4] Pretty J. Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1491): 447–465

[5] Kumaresan A, Pathak K A, Bujarbaruah K M, et al. Analysis of integrated animal-fish production system under subtropical hill agro ecosystem in India: Growth performance of animals, total biomass production and monetary benefit[J]. Tropical Animal Health and Production, 2009, 41(3): 385–391

[6] Berg H. Rice monoculture and integrated rice-fish farming in the Mekong Delta, Vietnam — Economic and ecological considerations[J]. Ecological Economics, 2002, 41(1): 95–107

[7] Pant J, Demaine H, Edwards P. Bio-resource flow in integrated agriculture-aquaculture systems in a tropical monsoonal climate: A case study in Northeast Thailand[J]. Agricultural Systems, 2005, 83(2): 203–219

[8] Pullin R S V, Shehadeh Z H. Integrated agriculture-aquaculture farming systems[C]//Proceedings of the ICLARM-SEARCA Conference on Integrated Agriculture-Aquaculture Farming Systems. Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM), 1979: 1–258

[9] Edwards P, Pullin R S V, Gartner J A. Research and Education for the Development of Integrated Crop-Livestock-Fish Farming Systems in the Tropics[M]. Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM), 1988: 1–53

[10] Edwards P. Environmental issues in integrated agriculture-aquaculture and wastewater-fed fish culture systems[C]//Pullin R S V, Rosenthal H, Maclean J L. Environment and Aquaculture in Developing Countries. Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM),

Deutsche Gesellschatt für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1993: 139–170
[11] 倪达书, 汪建国. 论稻鱼共生生态系统的应用价值[J]. 水产科技情报, 1983(6): 1–4
Ni D S, Wang J G. Application value of integrated rice-fish system[J]. Fisheries Sicence & Technology Information, 1983(6): 1–4
[12] 卢升高, 黄冲平. 稻田养鱼生态经济效益的初步分析[J]. 生态学杂志, 1988(4): 26–29
Lu S G, Huang C P. Economic and ecological effects of fish culture in paddy fields[J]. Chinese Journal of Ecology, 1988(4): 26–29
[13] 王缨, 雷慰慈. 稻田种养模式生态效益研究[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 311–316
Wang Y, Lei W C. Studies on the ecological effect of planting breeding models in the rice field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 311–316
[14] 王华, 黄璜. 湿地稻田养鱼、鸭复合生态系统生态经济效益分析[J]. 中国农学通报, 2002, 18(1): 71–75
Wang H, Huang H. Analysis on ecological and economic benefits of complex ecosystem in wetland paddy fields[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18(1): 71–75
[15] 蒋艳萍, 章家恩, 朱可峰. 稻田养鱼的生态效应研究进展[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2007, 20(4): 71–75
Jiang Y P, Zhang J E, Zhu K F. Reviews on ecological effects of rice-fish farming system[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology, 2007, 20(4): 71–75
[16] 林孝丽, 周应恒. 稻田种养结合循环农业模式生态环境效应实证分析——以南方稻区稻–鱼模式为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(3): 37–42
Lin X L, Zhou Y H. An analysis on the eco-environment effect of circular agriculture mode of planting-culture in the paddy field[J]. China Population Resources and Environment, 2012, 22(3): 37–42
[17] Rothuis A J, Vromant N, Xuan V T, et al. The effect of rice seeding rate on rice and fish production, and weed abundance in direct-seeded rice-fish culture[J]. Aquaculture, 1999, 172(3/4): 255–274
[18] Vromant N, Nhan D K, Chau N T H, et al. Effect of stocked fish on rice leaf folder *Cnapholocrocis medinalis* and rice caseworm *Nymphula depunctalis* populations in intensive rice culture[J]. Biocontrol Science and Technology, 2003, 13(3): 285–297
[19] Xie J, Hu L L, Tang J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): E1381–E1387
[20] 吕东锋, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共生对稻田杂草的生态防控试验研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(8): 1574–1578
Lü D F, Wang W, Ma X Z, et al. Ecological prevention and control of weeds in rice-crab polycultured field[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(8): 1574–1578
[21] Oehme M, Frei M, Razzak M A, et al. Studies on nitrogen cycling under different nitrogen inputs in integrated rice-fish culture in Bangladesh[J]. Nutrient Cycling in Agroecosvstems, 2007, 79(2): 181–191
[22] Frei M, Razzak M A, Hossain M M, et al. Methane emissions and related physicochemical soil and water parameters in rice-fish systems in Bangladesh[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 120(2/4): 391–398
[23] Frei M, Becker K. Integrated rice-fish culture: Coupled production saves resources[J]. Natural Resources Forum, 2005, 29(2): 135–143
[24] 黄毅斌, 翁伯琦, 唐建阳, 等. 稻–萍–鱼体系对稻田土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 74–76
Huang Y B, Weng B Q, Tang J Y, et al. Effect of rice-azolla-fish system on soil environment of rice field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 9(1): 74–76
[25] 刘元生, 孟庆红, 何腾兵, 等. 稻田生态养鱼水质动态与水稻生长及经济效益研究[J]. 耕作与栽培, 2003, (5): 5–6
Liu Y S, Meng Q H, He T B, et al. Studies in the water quality dynamics, rice growth and economic benefits of fish culture in paddy fields[J]. Tillage and Cultivation, 2003, (5): 5–6
[26] 高洪生. 北方寒地稻田养鱼对农田生态环境的影响初报[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 470–472
Gao H S. Preliminary report of the influence of the rice field fish culture to the farmland ecology environment in north cold area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 470–472
[27] 全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2023–2028
Quan G M, Zhang J E, Chen R, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2023–2028
[28] Datta A, Nayak D R, Sinhababu D P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from an integrated rainfed rice-fish farming system of Eastern India[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/3): 228–237
[29] 王昂, 王武, 马旭洲, 等. 养蟹稻田水环境部分因子变化研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(17): 3514–3519
Wang A, Wang W, Ma X Z, et al. Study on the changes of water environmental factors in rice-crab culture system[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(17): 3514–3519
[30] 汪清, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对土壤理化性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3948–3952
Wang Q, Wang W, Ma X Z, et al. The effects of integrated rice-crab production on soil physical and chemical properties[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(19): 3948–3952
[31] Tsuruta T, Yamaguchi M, Abe S I, et al. Effect of fish in rice-fish culture on the rice yield[J]. Fisheries Science, 2011, 77(1): 95–106
[32] Ali A B. Seasonal dynamics of microcrustacean and rotifer communities in Malaysian rice fields used for rice-fish farming[J]. Hydrobiologia, 1990, 206(2): 139–148
[33] 李岩, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对稻田水体底栖动物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 838–843
Li Y, Wang W, Ma X Z, et al. Effect of rice-crab culture system on zoobenthos diversity in paddy field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 838–843
[34] 李岩. 稻蟹共生对稻田水体浮游生物和底栖动物影响的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013: 1–41
Li Y. Study on the effects of plankton and zoobenthos in

rice-crab culture system[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013: 1–41

[35] 曹凑贵, 汪金平, 邓环. 稻鸭共生对稻田水生动物群落的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2644–2648
Cao C G, Wang J P, Deng H. The impact of rice-duck intergrowth on aquatic animals community of rice fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2644–2648

[36] 汪金平, 曹凑贵, 金晖, 等. 稻鸭共生对稻田水生生物群落的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2001–2008
Wang J P, Cao C G, Jin H, et al. Effects of rice-duck farming on aquatic community in rice fields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2001–2008

[37] 王昌付, 汪金平, 曹凑贵. 稻鸭共作对稻田水体底栖动物生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 933–937
Wang C F, Wang J P, Cao C G. Effect of rice-duck farming ecosystem on zoobenthos biodiversity in paddy field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 933–937

[38] 柯卫东, 黄新芳, 李建洪, 等. 我国水生蔬菜科研与生产发展概况[J]. 长江蔬菜, 2015(14): 33–37
Ke W D, Huang X F, Li J H, et al. Overview of aquatic vegetable production and research in China[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2015(14): 33–37

[39] 姚祥坦, 沈亚强, 倪龙凤, 等. 莲藕–鱼类种养结合栽培下不同莲藕品种比较[J]. 长江蔬菜, 2015(22): 61–64
Yao X T, Shen Y Q, Ni L F, et al. Comparison among different varieties of lotus root in integrated lotus root-fish farming system[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2015(22): 61–64

[40] Yang Y, Lin C K, Diana J S. Recycling pond mud nutrients in integrated lotus-fish culture[J]. Aquaculture, 2002, 212(1/4): 213–226

[41] 沈亚强, 姚祥坦, 张红梅, 等. 浙江北部低洼田湿地农业种养结合模式的环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 351–357
Shen Y Q, Yao X T, Zhang H M, et al. Environmental effects of integrated crop-fish farming systems for low-lying wetland in the north of Zhejiang Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(3): 351–357

[42] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志 淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1–134
Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X, et al. Economic Fauna of China, Freshwater Molluscs[M]. Beijing: Science Press, 1979: 1–134

[43] Brinkhurst R O. Guide to the Freshwater Aquatic Microdrile Oligochaetes of North America. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences[M]. Ottawa: NRC Research Press, 1986: 1–259

[44] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994: 1–570

[45] 王洪铸. 中国小蚓类研究: 附中国南极长城站附近地区两新种[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 1–228
Wang H Z. Studies on Taxonomy, Distribution and Ecology of Microdrile Oligochaetes of China, with Descriptions of Two New Species From the Vicinity of the Great Wall Station of China, Antarctica[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 1–228

[46] 吴东浩, 王备新, 张咏, 等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 129–134
Wu D H, Wang B X, Zhang Y, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(2): 129–134

[47] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2768–2775
Wang B X, Yang L F. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2768–2775

[48] 张跃平. 江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI 指数及水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 16–18
Zhang Y P. A study on tolerance value of benthic macroinvertebrates and biotic index in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006: 16–18

[49] 秦春燕. 长江三角洲淡水底栖动物耐污值修订和 BI 指数水质评价分级研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 27–34
Qin C Y. Quantitative tolerance values for common stream benthic macroinvertebrate and water quality classification use of biotic index (BI) in Yangtze River Delta[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 27–34

[50] Hilsenhoff W L. An improved biotic index of organic stream pollution[J]. Great Lakes Entomologist, 1987, 20(1): 31–39

[51] 胡成龙, 姜加虎, 陈宇炜, 等. 湖北省湖泊大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 129–138
Hu C L, Jiang J H, Chen Y W, et al. Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality of shallow lakes in Hubei Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 129–138

[52] 程旺大, 沈亚强, 姚祥坦. 嘉兴北部低洼田湿地农业种养结合模式构建及其机理研究(摘要)[M]//嘉兴市农业技术推广基金会. 生态循环时空换土地模式构建与技术. 上海: 上海科学技术出版社, 2014: 179–243
Cheng W D, Shen Y Q, Yao X T. Studies on the building and mechanisms of integrated crop-fish farming systems for low-lying wetland in the north of Jiaxing City (Abstract)[M]// Jiaxing Agrotechnology Extension Foundation. The Building and Mechanisms of Circular Agriculture Mode. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2014: 179–243

[53] Oertli B. Spatial and temporal distribution of the zoobenthos community in a woodland pond (Switzerland)[J]. Hydrobiologia, 1995, 300–301(1): 195–204

[54] 赵文, 董双林, 张美昭, 等. 盐碱池塘底栖动物的初步研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(3): 239–243
Zhao W, Dong S L, Zhang M Z, et al. Study of macrozoobenthos in saline-alkaline pondsz[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2001, 7(3): 239–243

[55] 赵峰. 池塘大型底栖动物群落结构及其部分生态功能的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 21–22
Zhao F. Studies on the community structure and some ecological function of macrozoobenthos in pond[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014: 21–22